

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

11 N° de publication :
(à utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 626 689

3

21 N° d' nregistrement national :

88 01057

51 Int Cl⁴ : G 05 F 1/67; H 02 M 3/156 / B 64 G 1/44.

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 29 janvier 1988.

30 Priorité :

43 Date de la mise à disposition du public de la
demande : BOP « Brevets » n° 31 du 4 août 1989.

60 Références à d'autres documents nationaux appa-
rentés :

71 Demandeur(s) : CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPA-
TIALES. — FR.

72 Inventeur(s) : Christian Rouzies.

73 Titulaire(s) :

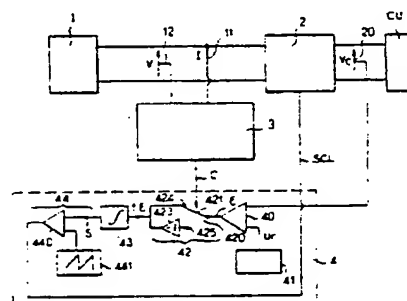
74 Mandataire(s) : Cabinet Regimbeau, Martin, Schrimpf,
Warcom et Ahner.

54 Système de régulation du point de fonctionnement d'une alimentation à courant continu.

57 L'invention concerne un système de régulation du point
de fonctionnement d'une alimentation à courant continu com-
prenant un système 1 générateur de courant couplé à un
convertisseur 2 à modulation de largeur d'impulsions.

Le système comprend des moyens 11, 12 de prélèvement et
de mesure de la tension V et du courant I délivrés par le
générateur de courant 1, des moyens 3 détecteurs à seuil de
décrochement du convertisseur 2, ces moyens délivrant un
signal logique C représentatif de l'état de décrochage ou de
non décrochage du convertisseur 2 par rapport aux valeurs de
seuil. Une boucle de régulation 4 comporte un élément de
commutation 42, lequel permet par inversion du signe du
signal d'erreur de renvoyer le point de fonctionnement vers le
point de puissance maximale (P_{max}) de la caractéristique de
sortie courant-tension du générateur d'intensité 1.

Application à la régulation des circuits d'alimentation élec-
trique d'installations spatiales.



FR 2 626 689 - A1

0

Vente des fascicules à l'IMPRIMERIE NATIONALE, 27, rue de la Convention — 75732 PARIS CEDEX 15

La présente invention est relative à un système de régulation du point de fonctionnement d'une alimentation à courant continu comprenant un système générateur de courant couplé à un convertisseur à modulation de largeur d'impulsions.

5 Dans le domaine de l'alimentation en énergie électrique des aéronefs ou des installations spatiales, l'alimentation est effectuée le plus souvent à partir de générateurs du type générateurs de courant, tels que des générateurs solaires. Ces générateurs désignés sous l'appellation de
10 générateurs de courant présentent une caractéristique de sortie courant-tension $I(V)$ sensiblement rectangulaire, à la fois source de courant dans sa zone (I) et source de tension dans sa zone (II), ainsi que représenté en figure 1a. La caractéristique de sortie puissance-tension $P(V)$ présente une allure sensiblement triangulaire, ainsi que représenté en figure 1b. Ces générateurs sont normalement associés à un convertisseur d'énergie
15 électrique dit à modulation de largeur, lequel est commandé de façon à délivrer des impulsions de tension rectangulaire de largeur variable en fonction de la puissance consommée par un circuit de charge. Ce type de convertisseur est plus communément désigné en vocable anglo-saxon par "PWM" et correspond à des dispositifs désignés sous le nom de "BUCK",
20 "BOOST" ou "BUCK-BOOST".

La caractéristique d'entrée courant-tension $I(V)$ d'un tel convertisseur alimentant une charge consommant une puissance constante présente l'allure de la partie positive d'une hyperbole équilatère ainsi que
25 représenté en figure 1c, ces convertisseurs essentiellement réactifs, et présentant un très bon rendement, ne consommant que très peu de puissance.

De manière classique, la boucle électronique de régulation de ces convertisseurs comporte un amplificateur d'erreur comparant la tension à réguler, la tension fournie à la charge, à une tension de référence, le signal
30 d'erreur amplifié étant délivré à un comparateur assurant la modulation de

largeur des impulsions de tension délivrées par le convertisseur en comparant le signal d'erreur à un signal engendré par un générateur de dent de scie. Un intégrateur est introduit à l'entrée du comparateur afin d'obtenir une erreur statique nulle.

5 Un convertisseur donné, suivant le sens de la variation du signal d'erreur en fonction de la variation de la tension à réguler, a donc son point de fonctionnement soit sur la zone I source de courant, soit sur la zone II source de tension de la caractéristique de sortie courant-tension du générateur pour une puissance consommée P constante, ainsi que représenté
10 en figure 1d et 1e.

Lorsque la puissance appelée par la charge devient de plus en plus importante, le point de fonctionnement précité se déplace progressivement sur la caractéristique de sortie $I(V)$ du générateur vers le point de puissance maximale P_{max} susceptible d'être fournie par le convertisseur.

15 Lorsque la puissance appelée devient supérieure à la puissance maximale P_{max} , le point de fonctionnement, préalablement situé sur la zone générateur de courant ou au contraire sur la zone générateur de tension, passe sur la zone générateur de tension ou générateur de courant réciproquement, ainsi que représenté en figure 1f et 1g, au delà ou en deça
20 du point de coordonnées $I(P_{max})$, $V(P_{max})$. Dans ces conditions, le point de fonctionnement devient instable car il y a un changement de régime de fonctionnement, c'est-à-dire passage de l'une à l'autre zone source de courant respectivement tension.

25 Le point de fonctionnement se déplace, en raison de son instabilité, et termine sa course sur le point de la caractéristique de sortie courant-tension $I(V)$ caractérisé, selon le cas, soit par $I = 0$, soit par $V = 0$ et correspond à une puissance fournie nulle par le générateur solaire; ce qui correspond au phénomène de décrochage, état stable de celui-ci, ainsi que représenté en figure 1f et 1g.

30 Un système permettant d'extraire la puissance maximale d'un générateur à courant continu de caractéristique $I(V)$ sensiblement

rectangulaire a été décrit dans la demande de brevet français n° 2 031 063. Ce système comprend une boucle de commande d'un transistor dans le convertisseur, le transistor étant commandé à fréquence variable. Ce système ne permet pas d'obtenir une tension régulée.

5 Le système de régulation du point de fonctionnement d'une alimentation à courant continu selon l'invention a pour objet de remédier aux inconvénients précités tout en assurant la suppression du phénomène de décrochage.

10 Un autre objet de la présente invention est la mise en oeuvre d'un système de régulation d'une alimentation à courant continu, dans lequel l'amplitude de l'excursion du point de fonctionnement autour du point de puissance maximale P_{max} est ajustable.

15 Un autre objet de la présente invention est également la mise en oeuvre d'un système de régulation d'une alimentation à courant continu dans lequel le point de fonctionnement à puissance demandée inférieure à la puissance maximale P_{max} peut être ajusté soit sur la zone de la caractéristique source de courant, soit sur la zone de la caractéristique source de tension.

20 Un autre objet de la présente invention est enfin la mise en oeuvre d'un système de régulation d'une alimentation à courant continu dans lequel le générateur solaire peut être couplé au convertisseur sans précaution particulière, un des points de fonctionnement correspondant à la puissance réellement appelée étant automatiquement atteint.

25 Le système de régulation du point de fonctionnement d'une alimentation à courant continu, objet de l'invention, comprend un système générateur de courant couplé à un convertisseur à modulation de largeur d'impulsions.

30 Il est remarquable en ce qu'il comprend des moyens de prélèvement et de mesure de la tension (V) et du courant (I) délivrés par ledit générateur de courant au convertisseur, ces moyens délivrant un signal représentatif de l'intensité (I) et de la tension (V), des moyens détecteurs à seuil du décrochage dudit convertisseur, ces moyens recevant les signaux représentatifs de l'intensité (I) et de la tension (V) délivrés par le

générateur d'intensité et délivrant un signal logique (C) représentatif de l'état de décrochage ou de non décrochage du convertisseur par rapport aux valeurs de seuil, une boucle de régulation de la largeur d'impulsions délivrées par le convertisseur, ladite boucle comportant des moyens de
5 prélèvement et de mesure de la tension (V_c) délivrée par le convertisseur à la charge, des moyens amplificateurs différentiels recevant sur une première entrée le signal délivré par lesdits moyens de mesure de la tension délivrée par le convertisseur et sur une deuxième entrée une tension de référence (U_r) et délivrant un signal d'erreur (\mathcal{E}) amplifié, des
10 moyens inverseurs comportant une borne d'entrée recevant ledit signal d'erreur amplifié et une borne de commande d'inversion recevant ledit signal logique (C) délivré par lesdits moyens détecteurs à seuils variables et délivrant le signal d'erreur inversé ($-\mathcal{E}$) des moyens intégrateurs recevant le signal d'erreur inversé ou non inversé ($\pm \mathcal{E}$) et délivrant un signal d'erreur
15 intégré (S), des moyens de modulation de largeur d'impulsions comportant un comparateur et un générateur de dent de scie, ledit comparateur comprenant une première borne d'entrée recevant dudit intégrateur ledit signal d'erreur intégré (S) et une deuxième borne d'entrée recevant le signal délivré par le générateur de dent de scie, ledit comparateur
20 comprenant une borne de sortie délivrant un signal de commande de largeur d'impulsions du convertisseur à modulation de largeur d'impulsions.

Le système de régulation objet de l'invention trouve application aux systèmes d'alimentation en énergie électrique de satellites artificiels, d'aéronefs spatiaux et, de manière plus générale, à tout système
25 d'alimentation en énergie électrique mettant en oeuvre des générateurs d'intensité tels que des batteries solaires, tant dans le domaine spatial que domestique.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description et à l'observation de dessins dans lesquels outre les figures 1a à 1g, relatives à
30 des diagrammes de fonctionnement d'un générateur de type classique,

- la figure 2a représente un schéma synoptique du système de régulation du point de fonctionnement d'une alimentation à courant continu comprenant un système générateur de courant couplé à un convertisseur à modulation de largeur d'impulsions,

- la figure 2b représente au point 1) et 2) les diagrammes de fonctionnement du point de fonctionnement du système au premier décrochement sur la caractéristique de sortie courant-tension $I(V)$ du générateur de courant,

5 - la figure 2c représente un diagramme explicatif du fonctionnement du dispositif tel que représenté en figure 2a, de façon plus détaillée dans les étapes successives aux figures 2b 1) ou 2), lorsque la puissance appelée est supérieure à P_{max} .

10 - la figure 3a représente un mode de réalisation préférentiel du système de régulation objet de l'invention tel que représenté en figure 2a,

- la figure 3b représente un diagramme de fonctionnement du point de fonctionnement du système sur la caractéristique de sortie courant-tension $I(V)$ du générateur de courant, lorsque la puissance appelée diminue en deçà de P_{max} .

15 - les figures 4a et 4b représentent un mode de réalisation particulier, non limitatif, préférentiel du système objet de l'invention, représenté en figure 3a.

20 - les figures 4c, 4d et 4e représentent des diagrammes explicatifs du fonctionnement du dispositif objet de l'invention tel que représenté en figure 4b.

Le système de régulation du point de fonctionnement d'une alimentation à courant continu objet de l'invention sera tout d'abord décrit en liaison avec la figure 2a.

25 L'alimentation à courant continu est réputée comprendre un système 1 générateur de courant, lequel est couplé à un convertisseur 2 à modulation de largeur d'impulsions. Le système 1 générateur de courant peut être constitué par un système à cellules solaires et la désignation système générateur de courant doit être comprise comme un système dont la caractéristique de sortie courant-tension est sensiblement rectangulaire ainsi que représentée en figure 1a.

30 Le convertisseur 2 à modulation de largeur d'impulsions est couplé au système générateur de courant. Il permet d'engendrer des impulsions rectangulaires de tension dont la largeur varie en fonction de la puissance appelée par la charge utile CU ; bien entendu, le convertisseur à

modulation de largeur d'impulsions comporte des circuits de lissage, non représentés sur la figure 2a, lesquels permettent de délivrer la tension continue V_c à la charge utile CU.

5 Conformément à un aspect particulièrement avantageux du système de régulation objet de l'invention, celui-ci comprend, ainsi que représenté en figure 2a, des moyens notés 11, 12 de prélèvement et de mesure de la tension V et du courant I délivré par le générateur de courant 1 au convertisseur 2. Les moyens de prélèvement et de mesure de la tension V et
10 du courant I peuvent avantageusement être constitués par un système potentiométrique en ce qui concerne la mesure de la tension V , et un dispositif shunt ou analogue, en ce qui concerne le prélèvement et la mesure du courant I . Ces éléments de type classique ne seront pas décrits en détail car parfaitement connus de l'homme du métier. Les moyens de
15 prélèvement et de mesure 11 et 12 délivrent un signal I , respectivement V , représentatifs de l'intensité I et de la tension V de sortie du générateur de courant, lesquels sont appliqués à l'entrée du convertisseur à modulation de largeur d'impulsions 2.

En outre, le système de régulation objet de l'invention comporte des
20 moyens 3 détecteurs à seuil de décrochage du convertisseur 2. L'état de décrochage du convertisseur 2 a été défini préalablement à partir des tensions correspondantes de tension V et d'intensité I délivrées par le générateur de courant 1 au convertisseur 2 en liaison avec les figures 1f et 1g. Les moyens 3 détecteurs à seuil du décrochage du convertisseur 2,
25 reçoivent les signaux représentatifs de l'intensité I et de la tension V délivrés par le générateur d'intensité I , au convertisseur 2 et délivre un signal logique C, représentatif de l'état de décrochage ou de non décrochage du convertisseur 2 par rapport aux valeurs de seuil. On comprendra bien entendu que les valeurs de seuil correspondent soit à une
30 valeur de tension V initialement faible, soit à une valeur d'intensité initialement faible, la comparaison de la valeur de tension V et d'intensité I effective à ces valeurs de seuil permettant lorsque les valeurs de tension V ou d'intensité I sont inférieures respectivement aux valeurs de seuil

correspondantes, de mettre en évidence l'état de décrochage ou de non décrochage du convertisseur 2, en fonction de la puissance appelée par la charge utile CU.

5 En outre, ainsi que représenté en figure 2a, le système de régulation objet de l'invention comporte une boucle de régulation 4 de la largeur d'impulsions délivrées par le convertisseur 2. La boucle de régulation 4 comporte, ainsi que représenté en figure 2a, des moyens 20 de prélèvement et de mesure de la tension V_c délivrée par le convertisseur 2 à la charge utile CU. Ces moyens peuvent être constitués par un montage
10 potentiométrique analogue à celui déjà mentionné pour la réalisation des moyens de prélèvement et de mesure de la tension V délivrée par le générateur de courant I .

La boucle de régulation 4 comporte également des moyens amplificateurs différentiels 40 recevant sur une première entrée le signal
15 délivré par les moyens 20 de mesure de la tension délivrée par le convertisseur 2 et sur une deuxième entrée une tension de référence notée U_r . Cette tension de référence est délivrée par un générateur de tension continue 41 convenablement stabilisé. Ce type de générateur ne sera pas décrit, car faisant appel à des connaissances normales de l'homme du
20 métier. Les moyens amplificateurs différentiels 40 délivrent un signal d'erreur amplifié noté E .

En outre, des moyens inverseurs 42 sont prévus, ces moyens inverseurs 42 comportant une borne d'entrée 420, connectée à la sortie de l'amplificateur différentiel 40 et recevant le signal d'erreur amplifié. Les
25 moyens inverseurs 42 comportent en outre une borne de commande d'inversion représentée schématiquement par une lame d'interrupteur notée 421, la borne de commande d'inversion 421 recevant le signal logique C délivré par les moyens 3 détecteur à seuil. Les moyens inverseurs comportent en outre une borne de transmission directe 424 du signal
30 d'erreur amplifié et une borne de transmission inverse du signal amplifié borne notée 425, laquelle est reliée à un inverseur noté 423. Les moyens

inverseurs 42 délivrent ainsi, sur commutation par l'intermédiaire du signal de commande C, le signal d'erreur amplifié non inversé par l'intermédiaire de la borne 424 ou le signal d'erreur amplifié inversé par l'intermédiaire de la borne 425 et de l'inverseur 423.

5 Des moyens intégrateurs 43 sont en outre prévus, ces derniers recevant le signal d'erreur inversé ou non inversé $\pm E$ et délivrant un signal d'erreur intégré noté S.

10 En outre, et de manière classique, des moyens 44 de modulation de largeur d'impulsions sont prévus, ceux-ci comportant un comparateur 440 et un générateur de dents de scie 441. Le comparateur comprend une première borne d'entrée recevant de l'intégrateur 43 le signal d'erreur intégré S et une deuxième borne d'entrée recevant le signal délivré par le générateur de dents de scie 441. La borne de sortie du comparateur 44 délivre un signal de commande, noté SCL, de largeur d'impulsions du convertisseur 2 à modulation de largeur d'impulsions. La largeur des impulsions est commandée par la durée de l'état haut du signal SCL, laquelle est elle-même commandée par le temps pendant lequel la tension en dents de scie délivrée par le générateur de dents de scie 441 est inférieure à la valeur du signal d'erreur amplifié inversé ou non $\pm E$.

20 Ainsi que l'on le comprendra de l'observation de la figure 2b, et en particulier aux points 1 et 2 de celle-ci, pour des valeurs de seuil de courant noté I_{min} et de tension V_{min} des moyens 3 détecteurs de décrochement à seuil du convertisseur 2, à chaque décrochement du convertisseur 2, c'est-à-dire pour chaque franchissement dans le point de fonctionnement du régulateur du point de puissance maximale P_{max} sur la caractéristique de sortie courant tension $I(V)$ du générateur de tension 1, l'un des paramètres de courant I ou d'intensité V du point de fonctionnement devient inférieur au seuil I_{min} ou V_{min} imposé, ce qui a pour effet d'entraîner le basculement des moyens inverseurs 42. Ce basculement

25

30

provoque lui-même une inversion de signe du signal d'erreur E dans la boucle de régulation 4, ce qui a pour effet de faire repartir le point de fonctionnement du convertisseur 2 vers le point de puissance maximale P_{max} évitant en cela indéfiniment l'état de décrochage du convertisseur 2.

Dans le cas où les conditions de fonctionnement sont telles que la puissance appelée P est supérieure à la puissance maximale P_{\max} et persiste, le point de fonctionnement oscille entre les deux positions extrêmes définies sur la caractéristique de sortie courant-tension $I(V)$ du générateur d'intensité, position extrême définie par les valeurs de seuil I_{\min} et V_{\min} , position notée A et B sur la figure 2b aux points 1 et 2 de celle-ci.

Afin d'extraire une puissance moyenne du générateur de courant 1 voisine de la puissance maximale P_{\max} que celui-ci est susceptible de fournir, conformément à une caractéristique particulièrement avantageuse du système de régulation objet de l'invention, les moyens 3 détecteurs à seuil de décrochage du convertisseur 2 sont des moyens détecteurs de décrochage à seuil variable. Les seuils variables précités permettent de faire évoluer ces seuils I_{\min} et V_{\min} encadrant le point de puissance maximum P_{\max} vers les coordonnées de ce point.

Dans ce but, les moyens 3 détecteurs à seuil variable peuvent opérer selon le processus ci-après :

- En partant du point de fonctionnement de coordonnées $V_0 = V_{\min}$, $I_0 = I(V_{\min})$ où, selon la notation habituelle $I(V_{\min})$, représente la valeur de l'intensité délivrée par le générateur de courant 1, pour la tension V délivrée par celui-ci égale à V_{\min} , ce point bien entendu correspond au point A de la figure 2b 1).

Le point de seuil suivant pourra être défini par exemple par le couple V_1, I_1 , la valeur d'intensité du courant I_1 étant définie par $I_1 = k_I \cdot I_0$ et la valeur V_1 correspondant à la valeur de tension sur la caractéristique de sortie courant-tension du générateur de courant 1. Les valeurs de seuil successives peuvent être alors définies à partir de la valeur de seuil V_1, I_1 précédente, par exemple par les couples $V_2 = k_V \cdot V_1$ et I_2 correspondant à la valeur d'intensité pour la valeur de tension V_2 précitée et de manière plus générale, par les couples suivants :

$$\begin{cases} V_2 = KV \times V_1 \\ I_2 \end{cases} \dots \longrightarrow \begin{cases} V_{2r} = kV \times V_{2r-1} \\ I_{2r} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} V_{2r+1} \\ I_{2r+1} = kI \times I_{2r} \end{cases}$$

Bien entendu, les coefficients kI et KV sont des coefficients strictement inférieurs à 1.

- En partant du point de fonctionnement de coordonnées

$10 = I_{min}$, $V_0 = V(I_{min})$ où selon la notation habituelle $V(I_{min})$ représente la valeur de la tension V sur la caractéristique de sortie courant-tension $I(V)$ du générateur de courant 1. Ce point correspond sensiblement au point B de la figure 2b aux points 1 et 2 de celle-ci.

la première valeur de seuil correspondant aux couples V_0 , 10 , peut alors être suivie d'une deuxième valeur de seuil correspondant à la valeur de couple $V_1 = K_V \times V_0$ et I_1 correspondant à l'intensité du courant délivrée par le générateur d'intensité pour la valeur de tension V_1 précitée, puis par la deuxième valeur de couple V_2 et $I_2 = k_I \cdot I_1$, où V_2 représente la valeur de la tension sur la caractéristique de sortie courant-tension du générateur d'intensité 1, pour l'intensité I_2 précitée. De manière générale, les valeurs de seuil successives correspondent aux valeurs de couple :

$$\begin{cases} V_2 \\ I_2 = kI \times I_1 \end{cases} \dots \longrightarrow \begin{cases} V_{2r} \\ I_{2r} = kI \times I_{2r-1} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} V_{2r+1} = KV \times V_{2r} \\ I_{2r+1} \end{cases}$$

kI et kV étant définis de même que précédemment.

On pourra le constater, l'évolution des valeurs de seuil I_{min} et V_{min} , telles que décrites précédemment, permet ainsi une convergence du point de fonctionnement vers le point de puissance maximale P_{max} .

Une description plus détaillée de la convergence du point de fonctionnement vers le point P_{max} de puissance maximale de la caractéristique sera donnée en liaison avec la figure 2c.

Lorsque la puissance appelée dépasse la puissance P_{max} , l'effet d'inversions successives par l'interrupteur K dans la boucle de régulation lors

de décrochements déclenchés par les franchissements des seuils initiaux I_{min} et V_{min} , les seuils successifs convergent respectivement vers $I(P_{max})$ et $V(P_{max})$.

5 Le convertisseur extrait une puissance $P < P_{max}$ mais la puissance fournie P tend vers P_{max} . Lorsque la puissance appelée P est supérieure à la puissance maximale P_{max} , la tension délivrée par le convertisseur ne peut rester voisine de la valeur de consigne, sauf dans le cas où une source auxiliaire apporte le complément de puissance nécessaire.

10 Ainsi que représenté en figure 2c, à chaque franchissement de seuil I_{2r} , est retenu pour le prochain seuil de tension, la tension correspondante $V(I_{2r}) \times kV$ avec $kV < 1$. De la même façon, à chaque franchissement, le seuil V_{2r} est retenu pour le prochain seuil d'intensité, le courant correspondant $(V_{2r}) \times kI$ avec $kI < 1$.

En régime établi, les seuils finaux ont respectivement pour valeur :

- 15 - Pour le seuil d'intensité : $kI \times I_f$
 - Pour le seuil de tension : $kV \times V_f$ tels que :

$$V = f(kI \times I_f) = V_f \text{ et } I = f^{-1}(kV \times V_f) = I_f$$

Dans le cas où kI et kV tendent vers la valeur 1, $kI \times I_f$ tend vers $I(P_{max})$ et $kV \times V_f$ tend vers $V(P_{max})$ mais la convergence est plus lente.

20 Un mode de réalisation particulièrement adapté à la réalisation du processus précédemment cité sera donné, en liaison avec la figure 3a.

Conformément à la figure précitée, les moyens 3 détecteurs à seuil de décrochement du convertisseur 2, les seuils étant variables, comportent directement connectés respectivement aux moyens de prélèvement et de mesure de la tension V et du courant I , notés 11, 12, un premier circuit comparateur 31 constitué par un amplificateur différentiel. La borne négative du comparateur 31 est directement connectée en sortie des moyens de prélèvement et de mesure de la tension V , et la borne positive de ce même comparateur est connectée en sortie des moyens 12 de
 25 prélèvement et de mesure de la tension V par l'intermédiaire d'un premier circuit atténuateur 310, connecté en cascade avec un premier circuit
 30

échantillonneur-bloqueur 311. Bien entendu, le premier circuit atténuateur 310 présente un coefficient d'atténuation kV , inférieur à 1.

5 Les moyens 3 détecteurs à seuil comportent également un deuxième circuit comparateur 32, constitué par un amplificateur différentiel dont la borne négative est directement connectée en sortie des moyens 11 de prélèvement et de mesure de l'intensité I et dont la borne positive est connectée en sortie des moyens de prélèvement et de mesure de l'intensité I , par l'intermédiaire d'un deuxième circuit atténuateur 320, connecté en cascade avec un deuxième circuit 321 échantillonneur-bloqueur. Le
10 deuxième circuit atténuateur 320 présente un coefficient d'atténuation kI , inférieur à 1.

En outre, ainsi qu'on l'a représenté en figure 3a, les moyens 3 de détection à seuil variable comportent une bascule 33 de type RS, dont l'entrée R est directement connectée à la sortie du deuxième comparateur
15 32 et dont l'entrée S est directement connectée à la sortie du premier comparateur 31. La sortie Q de la bascule 33 de type RS délivre le signal logique C représentatif de l'état de décrochage ou de non décrochage du convertisseur 2, par rapport aux valeurs de seuil variables précitées. La sortie Q de la bascule de type RS 33 est reliée directement à l'entrée de
20 commande d'échantillonnage-blocage du premier échantillonneur-bloqueur 311 et la sortie Q à l'entrée de commande d'échantillonnage-blocage du deuxième échantillonneur-bloqueur 321. Les échantillonneurs-bloqueurs 321 et 311 permettent de mémoriser chacun alternativement une fraction kI du courant I délivré par le générateur de courant 1, lorsque le dernier seuil de tension V_r est franchi et une fraction kV de la tension V délivrée par le
25 générateur de courant 1 au convertisseur 2, lorsque le dernier seuil de courant I_r est franchi. Le franchissement des seuils ainsi mémorisés correspondant donc à des valeurs variables conformément à la loi de variation précédemment décrite, est détecté par les comparateurs 31 et
30 32, lesquels commandent alors la bascule RS 33, celle-ci délivrant le signal logique C de commande de commutation du signe du signal d'erreur amplifié. En outre, les moyens 3 de détection à seuil variable comportent

connectés en sortie des échantillonneurs bloqueurs 311 et 321 assurant la liaison avec l'entrée positive des premier et deuxième comparateurs 31, 32, un circuit d'aiguillage conditionnel 312, 322, recevant sur une première entrée le signal délivré par l'échantillonneur bloqueur correspondant 311 ou 321 et sur une deuxième entrée une tension de référence V_{r1} , V_{r2} , représentative de la valeur de seuil limite V_{min} respectivement I_{min} . Chacun des circuits d'aiguillage conditionnel 312, 322 permet d'assurer la transmission de la plus grande des valeurs constituée par la valeur du signal délivré par l'échantillonneur bloqueur correspondant ou par la tension de référence V_{r1} ou V_{r2} .

Ainsi, lorsque la puissance appelée par la charge utile croît et est $> P_{max}$, les dernières valeurs de seuil échantillonnées varient en conséquence et les valeurs de seuil limites de tension V et de courant I délivrées par le générateur d'intensité 1, convergent vers les valeurs correspondantes de courant et de tension du point de puissance maximale P_{max} , valeurs notées $I(P_{max})$ et $V(P_{max})$ ainsi que représentées sur la figure 2c.

Lorsque la puissance appelée P par la charge utile CU devient inférieure à la puissance maximale P_{max} , susceptible d'être fournie par le générateur d'intensité 1, le convertisseur 2 se positionne alors avec équi-probabilité, sur l'un des deux points de fonctionnement possibles, notés A_i et B_i sur la figure 3b.

Un mode de réalisation pratique permettant d'une part l'initialisation des valeurs V_{min} et I_{min} et d'autre part d'imposer un point de fonctionnement tel que le point A_i représenté en figure 3b sera décrit en liaison avec les figures 4a et 4b.

Selon la figure 4a, pour lesquelles les références correspondent au circuit d'aiguillage conditionnel 312 à titre d'exemple non limitatif, celui-ci comporte une diode Zener 3120 délivrant la tension de référence V_{r1} , représentative de la valeur de tension V_{min} ou I_{min} . La diode Zener 3110 est reliée d'une part à une résistance 3121 alimentée par une source

de tension d'alimentation +E et d'autre part, à une première diode 3122 polarisée dans le sens passant par rapport à la source d'alimentation -E. La diode 3122 est connectée à la borne d'entrée positive du comparateur 31 chargée par une résistance 3123 connectée en parallèle sur la borne positive du comparateur 31. Une deuxième diode 3124 assure la liaison entre la sortie de l'échantillonneur bloqueur 311, la borne d'entrée positive du comparateur 31. Les deux diodes 3122, 3124 et la résistance 3123 jouent le rôle d'une porte OU analogique permettant la transmission du signal dont la valeur d'amplitude est la plus élevée.

Pour des raisons de contraintes électriques imposées aux composants de l'ensemble du système d'alimentation et du système de régulation objet de l'invention, il peut être souhaitable d'imposer l'un des deux points de fonctionnement Ai ou Bi, tels que représentés en figure 3b.

Ainsi, le point Bi sera choisi si on veut limiter le courant absorbé par le convertisseur 2 à un courant I_L tel que $I_{Ai} > I_L > I_{Bi}$.

Au contraire, le point Ai sera choisi si on veut limiter la tension d'entrée du convertisseur 2, à une tension V_L telle que $V_{Bi} > V_L > V_{Ai}$.

Pour des raisons de limitation de contraintes électriques sur les composants, on peut être amené à imposer le point de fonctionnement lorsque la caractéristique $I(V)$ du générateur 1, tel qu'un générateur solaire varie fortement. Ces variations correspondent par exemple à des situations telles que sonde spatiale se rapprochant du soleil, point de fonctionnement immédiatement positionné sur la partie source de courant, courant d'entrée du convertisseur limitée à I_{min} .

Ainsi que représenté en figure 4c, le point de fonctionnement peut être situé sur la zone "source de courant" sur le générateur si on veut limiter la tension d'entrée du convertisseur à une valeur V_{lim} ou sur la zone "source de tension" sur le générateur si on veut au contraire limiter le courant d'entrée du convertisseur à une valeur I_{lim} .

Afin d'imposer au point de fonctionnement situé sur la zone "source de courant" le passage sur la zone "source de tension" et dans le but

d'éviter que le courant d'entrée du convertisseur ne dépasse I_{lim} , ainsi qu'il est représenté en figure 4b, les moyens 3 de détection à seuil variable comportent en outre un comparateur 323 dont la borne positive est reliée aux moyens de prélèvement et de mesure d'intensité I_l et dont la borne négative est reliée à une tension de référence V_{r3} représentative de l'intensité limite I_{lim} . Le comparateur 323 par détection du dépassement délivre, par sa sortie connectée à l'entrée S de la bascule RS33 par l'intermédiaire d'une porte OU 314 recevant sur une deuxième entrée le signal délivré par la sortie du comparateur 31, un signal de commande, ce qui permet d'introduire une inversion correspondante dans la boucle de régulation 4, rendant le point de fonctionnement initial instable. Simultanément, afin d'éviter qu'éventuellement le seuil d'intensité du détecteur de décrochement n'empêche le point de fonctionnement d'arriver sur la zone "source de tension", un interrupteur 325 commandé par la sortie du comparateur 323 permet la mise en court-circuit de l'échantillonneur bloqueur 321, ce qui permet d'entrer une valeur nulle sur l'échantillonneur bloqueur 321, le seuil d'intensité ne pouvant alors être réinitialisé qu'à la valeur I_{min} , s'il ne l'était déjà.

Afin d'imposer au point de fonctionnement situé sur la zone "source de tension" le passage sur la zone "source de courant" en vue d'éviter que la tension d'entrée du convertisseur ne dépasse V_{lim} , les moyens 3 de détection à seuil variable comportent un autre comparateur 313 dont la borne positive est reliée aux moyens de prélèvement et de mesure de tension et dont la borne négative est reliée à une tension de référence V_{r4} représentative de la tension limite V_{lim} . Le comparateur 313, sur détection du dépassement, délivre par sa sortie connectée à l'entrée S de la bascule RS33 par l'intermédiaire d'une porte OU314 recevant sur une deuxième entrée le signal délivré par la sortie du comparateur 31, un signal de commande permettant d'introduire une inversion correspondante dans la boucle de régulation 4. En outre, afin d'éviter qu'éventuellement le seuil de tension du détecteur de décrochement n'empêche le point de fonctionne-

ment d'arriver sur la zone "source de courant", un interrupteur 326 commandé par la sortie du comparateur 313 permet la mise en court-circuit simultanée de l'échantillonneur bloqueur 312, ce qui permet d'entrer une valeur nulle sur l'échantillonneur bloqueur 312, le seuil de tension ne

5

pouvant alors être réinitialisé qu'à la valeur V_{min} , s'il ne l'était déjà. Bien entendu, une utilisation simultanée des circuits de limitation de l'intensité et de la tension aux valeurs I_{lim} et V_{lim} pourra être effectuée pourvu que la caractéristique $I(V)$ du générateur 1, générateur solaire embarqué sur satellite par exemple, soit telle que :

10

$$\begin{array}{lll} V_{lim} \geq V_{CO} & \text{OU BIEN} & I_{lim} \geq I_{CC} \\ \text{ET} & & \text{ET} \\ P \leq I_{lim} \times V(I_{lim}) & & P \leq V_{lim} \times I(V_{lim}) \end{array}$$

ainsi que représenté en figures 4d et 4e.

15

Un mode de réalisation plus particulièrement avantageux des moyens amplificateurs différentiels 40 et des moyens inverseurs 42 précédemment décrits en liaison avec la figure 2a sera maintenant décrit en liaison avec la figure 3a précédemment citée.

20

Conformément à la figure 3a précitée, les moyens amplificateurs différentiels 40 et les moyens inverseurs 42 peuvent avantageusement être constitués par un premier amplificateur d'erreur 401, dont l'entrée positive est connectée à la tension de référence U_r délivrée par la source de tension de référence 41 non représentée sur la figure 3a. L'entrée négative du premier amplificateur d'erreur 401 est connectée aux moyens 20 de prélèvement et de mesure de la tension V_c délivrée par le convertisseur 2. La sortie du premier amplificateur d'erreur 401 délivre un premier signal d'erreur noté ε_1 .

25

30

En outre, est prévu un deuxième amplificateur d'erreur 402 dont l'entrée négative est connectée à la tension de référence U_r et dont l'entrée positive est connectée aux moyens 20 de prélèvement et de mesure de la tension V_c délivrée par le convertisseur 2. La sortie du deuxième amplificateur d'erreur 402 délivre un deuxième signal d'erreur ε_2 et le gain du deuxième amplificateur d'erreur 402 est identique au gain du premier amplificateur d'erreur 401. Le deuxième amplificateur d'erreur

402 délivre donc, compte-tenu des indications précédentes, un signal d'erreur ϵ_2 tel que $\epsilon_2 = -\epsilon_1$. La borne de sortie du premier amplificateur d'erreur 401 et la borne de sortie du deuxième amplificateur d'erreur 402 sont reliés directement à un point commun, lequel est relié à la borne d'entrée de l'intégrateur 43. Cette liaison avec effectuée par l'intermédiaire de résistances de charge R et de transistors de commutation T1, T2 montés en émetteur commun et dont la base est reliée respectivement à la sortie Q, \bar{Q} de la bascule RS33. Les résistances de polarisation des transistors T1 et T2 sont notées r_b . On notera bien entendu que l'interrupteur K est ainsi constitué par les transistors T1, T2. La commutation à l'ouverture et réciproquement à la fermeture précitée permet au point commun du transistor T1, respectivement T2, de délivrer un signal d'erreur amplifié ϵ_1 , ou ϵ_2 avec $\epsilon = \epsilon_1$ ou $\epsilon = -\epsilon_1$. Le mode de réalisation précité permet donc d'obtenir un niveau de la borne de sortie, un signal d'erreur amplifié inversé ou non $-\epsilon$.

On a ainsi décrit un système de régulation du point de fonctionnement d'une alimentation à courant continu comprenant un système générateur de courant couplé à un convertisseur à modulation de largeur d'impulsions particulièrement performant.

Le système de régulation objet de l'invention apparaît particulièrement bien adapté à une utilisation spatiale pour l'alimentation en énergie électrique de circuits électroniques de satellites artificiels ou d'aéronefs et plus particulièrement de sondes d'exploration spatiale. Dans ce cas, en raison de la quasi-impossibilité d'intervention en cas de défaillance et de la méconnaissance de l'évolution du comportement du générateur solaire, le générateur d'intensité I, cette électronique de régulation permet de se prémunir des défauts de fonctionnement dus à des conditions de fonctionnement particulièrement défavorables, conditions défavorables consistant par exemples en des dégradations diverses, état de pénombre, dépointage du soleil, éloignement du soleil, variation de température, ou analogue. Bien entendu, la configuration de l'alimentation

proprement dite n'est pas limitative, un ensemble de stockage tampon constitué par une batterie éventuellement en série avec un régulateur de décharge pouvant être connecté en parallèle sur la charge utile CU, en sortie du convertisseur. Le fonctionnement de l'ensemble du système de régulation objet de l'invention n'est bien entendu pas modifié par la présence d'un tel ensemble de stockage tampon.

Le système de régulation du point de fonctionnement d'une alimentation à courant continu objet de l'invention permet d'assurer un fonctionnement satisfaisant même en dépit de la modification des caractéristiques courant-tension du générateur solaire, modification due au vieillissement et/ou aux conditions d'environnement des composants électroniques le constituant.

REVENDECATIONS

1. Système de régulation du point de fonctionnement d'une alimentation à courant continu comprenant un système (1) générateur de courant couplé à un convertisseur (2) à modulation de largeur d'impulsions, caractérisé en ce que ledit système de régulation comprend :
- 5 . des moyens (12, 11) de prélèvement et de mesure de la tension (V) et du courant (I) délivrés par ledit générateur de courant (1) audit convertisseur (2), lesdits moyens (11, 12) délivrant un signal représentatif de ladite intensité (I) et de ladite tension (V),
 - 10 . des moyens (3) détecteurs à seuil de décrochage dudit convertisseur (2), lesdits moyens (3) recevant lesdits signaux représentatifs de l'intensité (I) et de la tension (V) délivrés par ledit générateur d'intensité (1) et délivrant un signal logique (C) représentatif de l'état de décrochage ou de non décrochage dudit convertisseur (2) par rapport auxdites valeurs de seuil,
 - 15 . une boucle de régulation (4) de la largeur d'impulsions délivrée par le convertisseur, ladite boucle comprenant :
 - des moyens (20) de prélèvement et de mesure de la tension (VC) délivrée par ledit convertisseur (2) à la charge (CU),
 - 20 - des moyens amplificateurs différentiels (40) recevant sur une première entrée le signal délivré par lesdits moyens (20) de mesure de la tension délivrée par le convertisseur et sur une deuxième entrée une tension de référence (U_r) et délivrant un signal d'erreur (ϵ) amplifié,
 - 25 - des moyens inverseurs (42) comportant une borne d'entrée (420) recevant ledit signal d'erreur amplifié et une borne de commande d'inversion (421) recevant ledit signal logique (C) délivré par lesdits moyens détecteurs à seuils et délivrant le signal d'erreur inversé ou non inversé ($\pm \epsilon$),
 - 30 - des moyens intégrateurs (43) recevant le signal d'erreur inversé ou non inversé ($\pm \epsilon$) et délivrant un signal d'erreur intégré (S),

- des moyens (44) de modulation de largeur d'impulsions comportant un comparateur (440) et un générateur de dent de scie (441), ledit comparateur comprenant une première borne d'entrée recevant dudit intégrateur (43) ledit signal d'erreur intégré (S) et une deuxième borne d'entrée recevant le signal délivré par le générateur de dent de scie (441), ledit comparateur (44) comprenant une borne de sortie délivrant un signal de commande (SCL) de largeur d'impulsions du convertisseur à modulation de largeur d'impulsions.

2. Système selon la revendication 1, caractérisé en ce que lesdits moyens (3) détecteurs à seuil de décrochement dudit convertisseur (2) sont des moyens détecteurs de décrochement à seuil variable.

3. Système selon la revendication 2, caractérisé en ce que lesdits moyens (3) détecteurs à seuil de décrochement dudit convertisseur (2) à seuil variable comportent, directement connectés respectivement aux moyens de prélèvement et de mesure de la tension (V) et du courant (I) délivrés par le générateur de courant audit convertisseur et recevant respectivement ledit signal représentatif de la tension (V) et de l'intensité (I) délivrés par le générateur de courant audit convertisseur :

- un premier circuit comparateur (31), constitué par un amplificateur différentiel, dont la borne négative est directement connectée en sortie desdits moyens de prélèvement et de mesure de la tension (V) et dont la borne positive est connectée en sortie desdits moyens (12) de prélèvement et de mesure de la tension (V) par l'intermédiaire d'un premier circuit atténuateur (310) de coefficient d'atténuation (KV) connecté en cascade avec un premier circuit échantillonneur bloqueur (311),

- un deuxième circuit comparateur (32) constitué par un amplificateur différentiel dont la borne négative est directement connectée en sortie desdits moyens (11) de prélèvement et de mesure de l'intensité (I) et dont la borne positive est connectée en sortie desdits moyens de prélèvement et de mesure de l'intensité (I) par l'intermédiaire d'un deuxième circuit atténuateur (320) de coefficient d'atténuation (KI) connecté en cascade avec un deuxième circuit (321) échantillonneur bloqueur,

5 - une bascule (33) de type RS dont l'entrée R est directement connectée à la sortie dudit deuxième comparateur (32) et dont l'entrée S est directement connectée à la sortie dudit premier comparateur (31), la sortie Q ou \overline{Q} de ladite bascule (33) de type RS étant représentative de l'état de décrochage ou de non décrochage dudit convertisseur par rapport auxdites valeurs de seuil, ladite sortie Q ou \overline{Q} de la bascule de type RS étant reliée directement à l'entrée de commande d'échantillonnage blocage du premier échantillonneur bloqueur (311) et à l'entrée de la commande d'échantillonnage blocage du deuxième échantillonneur bloqueur (321) respectivement.

10 4. Système selon la revendication 3, caractérisé en ce que lesdits premier et deuxième échantillonneurs bloqueurs sont connectés à l'entrée du comparateur (31), respectivement (32), par l'intermédiaire d'un circuit d'aiguillage conditionnel (312, 322) de valeur de tension respectivement d'intensité de référence représentative de valeurs de seuil (V_{min}) ou (I_{min}).

15 5. Système selon la revendication 4, caractérisé en ce que chaque circuit d'aiguillage conditionnel (312, 322) d'une valeur de tension respectivement d'intensité de référence (V_{min} , I_{min}) comporte :

20 - une diode Zener (3120) délivrant une tension de référence (V_{r1}) représentative de la valeur de tension (V_{min}) ou (I_{min}), ladite diode Zener (3120) étant reliée d'une part à une résistance (3121) alimentée par une source de tension d'alimentation +E et d'autre part à une première diode (3122) polarisée dans le sens passant par rapport à la source d'alimentation +E, ladite diode (3122) étant connectée à la borne d'entrée positive du comparateur (31),

25 - une deuxième diode (3124) assurant la liaison entre la sortie de l'échantillonneur bloqueur (311) et la borne d'entrée positive du comparateur (31), les deux diodes (3122, 3124) et la résistance (3123) jouant le rôle d'une porte OU analogique permettant la transmission du signal dont la valeur d'amplitude est la plus élevée.

30

6. Système selon la revendication 6, caractérisée en ce que en vue d'imposer le point de fonctionnement (I,V) du convertisseur à l'un des points A_i , B_i , intersection de la caractéristique (I,V) du générateur et de la courbe de puissance de consommation $P = \text{cste}$, inférieure à P_{max} , celui-ci

5 comporte, afin d'imposer au point de fonctionnement situé sur la zone "source de courant" le passage sur la zone "source de tension" et afin de limiter l'intensité d'entrée du convertisseur à une valeur inférieure à une valeur limite I_{lim} ,

- un comparateur (323) dont la borne positive est reliée aux moyens

10 de prélèvement et de mesure d'intensité (11) et dont la borne négative est reliée à une tension de référence V_{r3} représentative de l'intensité limite I_{lim} ,

- une porte OU (314) recevant sur une première entrée le signal délivré par le comparateur (31) et sur une deuxième entrée le signal

15 délivré par le comparateur (323), ce qui permet d'introduire une inversion correspondante dans la boucle de régulation (4), rendant le point de fonctionnement initial instable.

7. Système selon la revendication 5 ou 6, caractérisé en ce que, en vue d'imposer au point de fonctionnement situé sur la zone "source de

20 tension" le passage sur la zone "source de courant" et afin de limiter la tension d'entrée du convertisseur à une tension inférieure à une valeur limite V_{lim} , celui-ci comporte :

- un comparateur (313) dont la borne positive est reliée aux moyens de prélèvement et de mesure de tension (20) et dont la borne négative est

25 reliée à une tension de référence V_{r4} représentative de la tension limite V_{lim} ,

- une porte OU (314) recevant sur une première entrée le signal délivré par le comparateur (32) et sur une deuxième entrée le signal

30 délivré par le comparateur (313), ce qui permet d'introduire une inversion correspondante dans la boucle de régulation (4), rendant le point de fonctionnement initial instable.

8. Système selon l'une des revendications 6 ou 7, caractérisé en ce qu'il comporte en outre un interrupteur (325), (326) connecté en parallèle sur l'entrée de l'échantillonneur bloqueur (321) respectivement (311), chaque interrupteur (325, 326) étant commandé par la sortie du comparateur (323) respectivement (313) ce qui permet d'entrer une valeur nulle sur l'échantillonneur bloqueur, le seuil d'intensité ou de tension ne pouvant alors être réinitialisé qu'à la valeur I_{min} ou respectivement V_{min} .

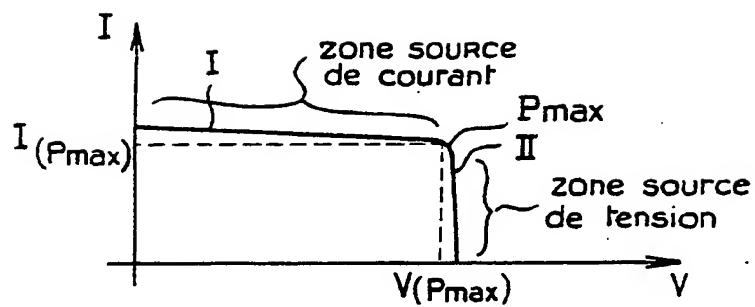
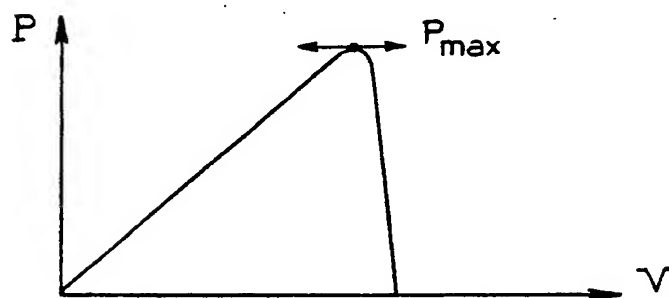
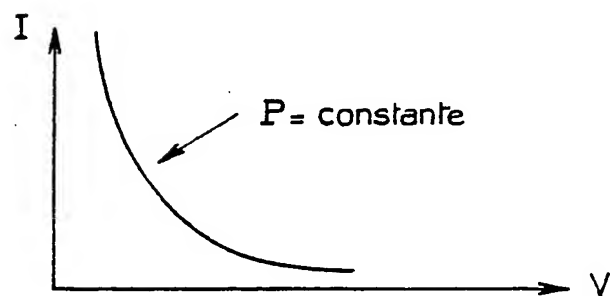
9. Système selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que lesdits moyens amplificateurs différentiels (40) et lesdits moyens inverseurs (42) sont constitués par :

- un premier amplificateur d'erreur (401) dont l'entrée positive est connectée à ladite tension de référence (U_r) et dont l'entrée négative est connectée auxdits moyens (20) de prélèvement et de mesure de la tension (V_c) délivrée par le convertisseur (2), la sortie dudit premier amplificateur d'erreur (40) délivrant un premier signal d'erreur (ε_1),

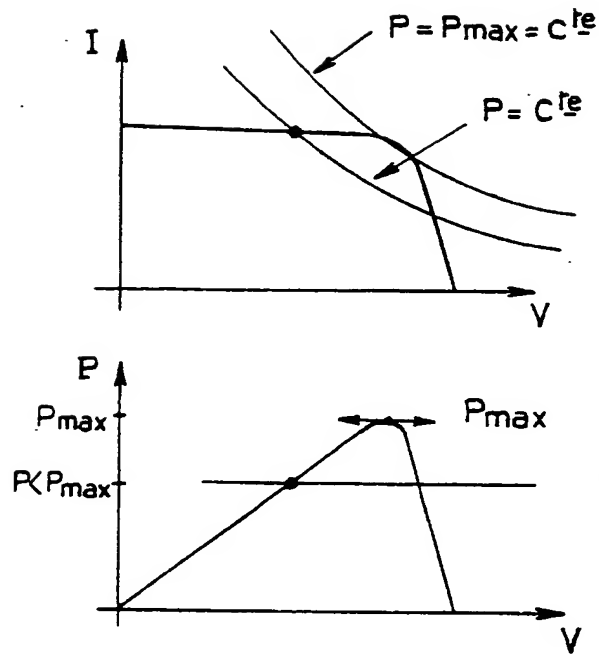
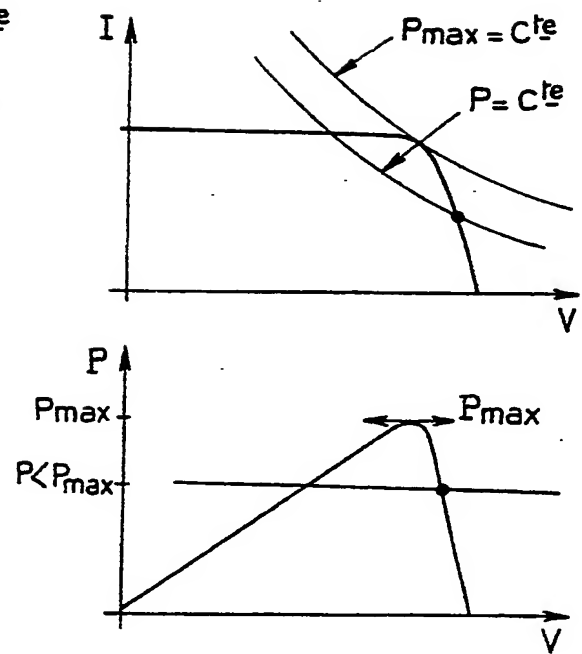
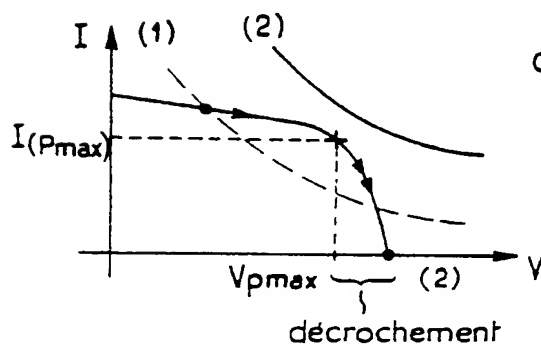
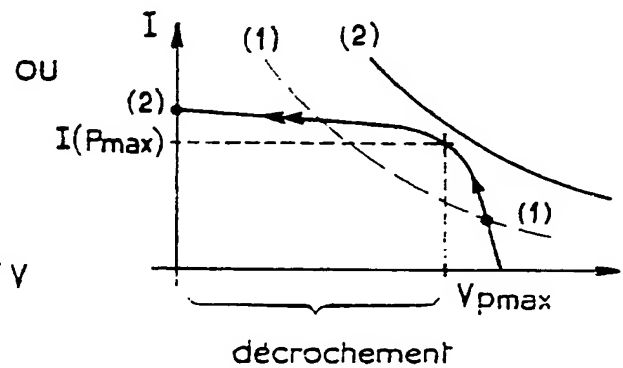
- un deuxième amplificateur d'erreur (402) dont l'entrée négative est connectée à ladite tension de référence (U_r) et dont l'entrée positive est connectée auxdits moyens (20) de prélèvement et de mesure de la tension (V_c) délivrée par le convertisseur (2), la sortie du deuxième amplificateur d'erreur délivrant un deuxième signal d'erreur (ε_2) avec ($\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$), la borne de sortie dudit premier amplificateur d'erreur (401) et la borne de sortie dudit deuxième amplificateur d'erreur (402) étant reliées directement à un point commun, lequel est relié à la borne d'entrée de l'intégrateur 43, la liaison au point commun étant effectuée par l'intermédiaire de résistance R et de transistors de commutation T1, T2, montés en émetteur commun et dont la base est reliée respectivement à la sortie Q, \overline{Q} de la bascule RS 33, la commutation à l'ouverture réciproquement à la fermeture des transistors T1, respectivement T2, permettant de délivrer un signal d'erreur amplifié $\varepsilon = \varepsilon_1$ ou $\varepsilon = -\varepsilon_1$.

30

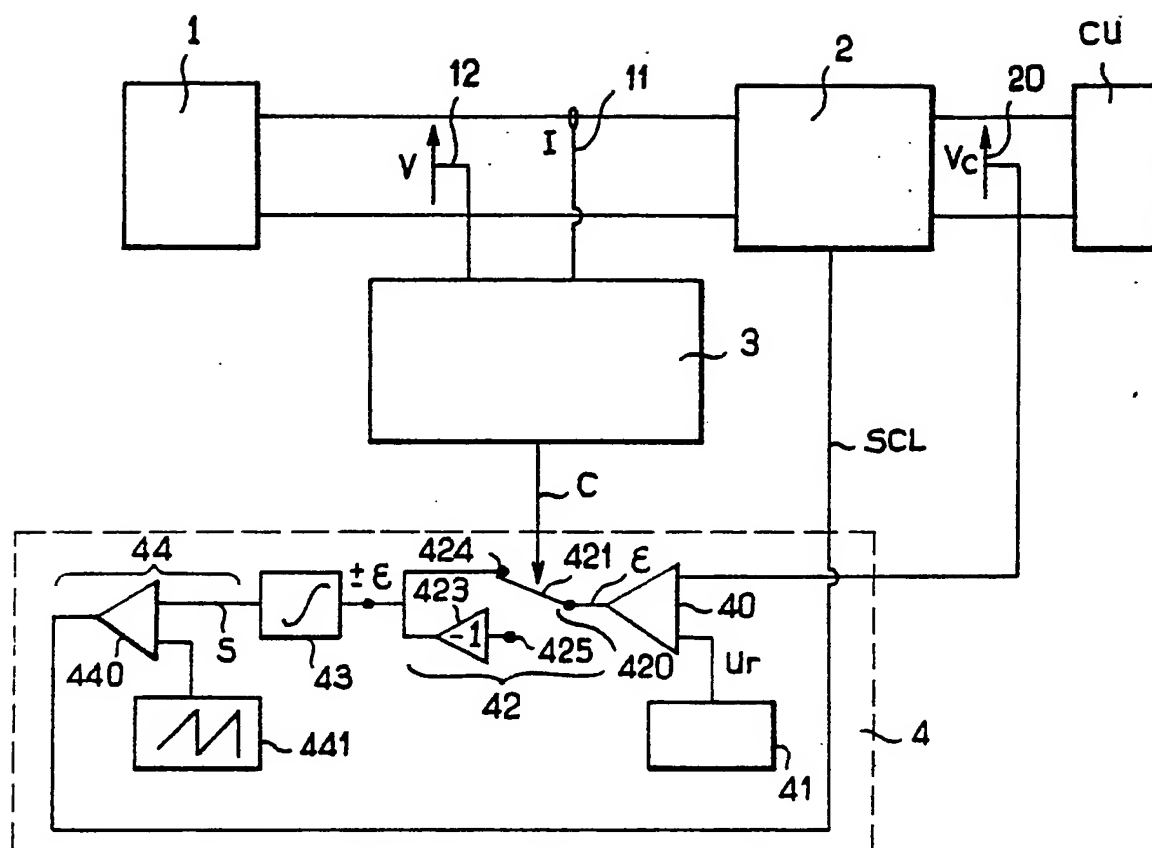
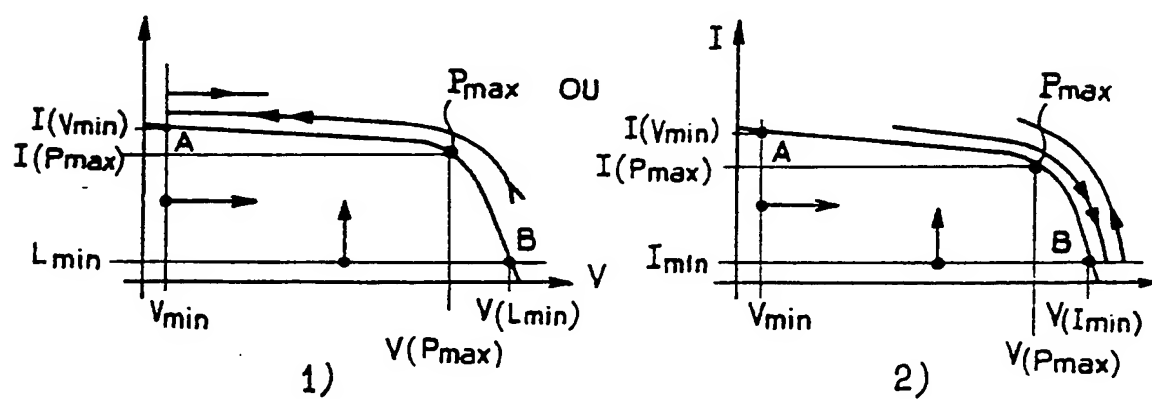
1 / 7

FIG. 1aFIG. 1bFIG. 1c

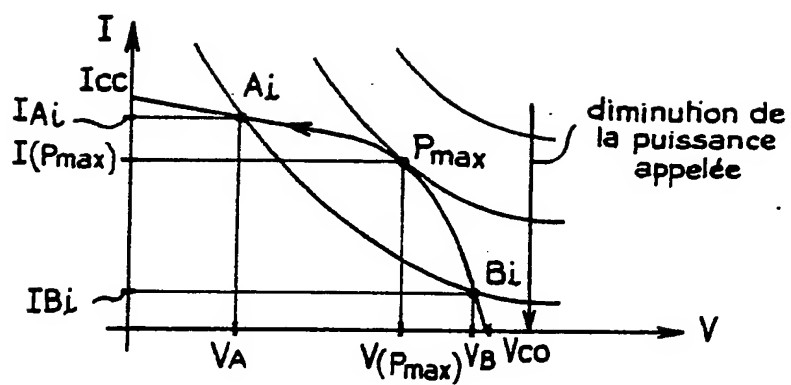
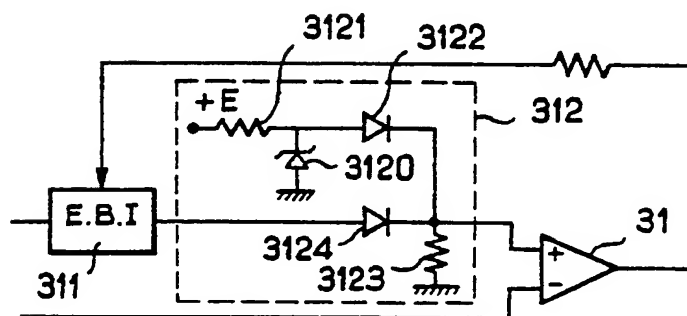
2 / 7

FIG. 1dFIG. 1eFIG. 1fFIG. 1g

3 / 7

FIG. 2aFIG. 2b

5 / 7

FIG. 3bFIG. 4a

6/7

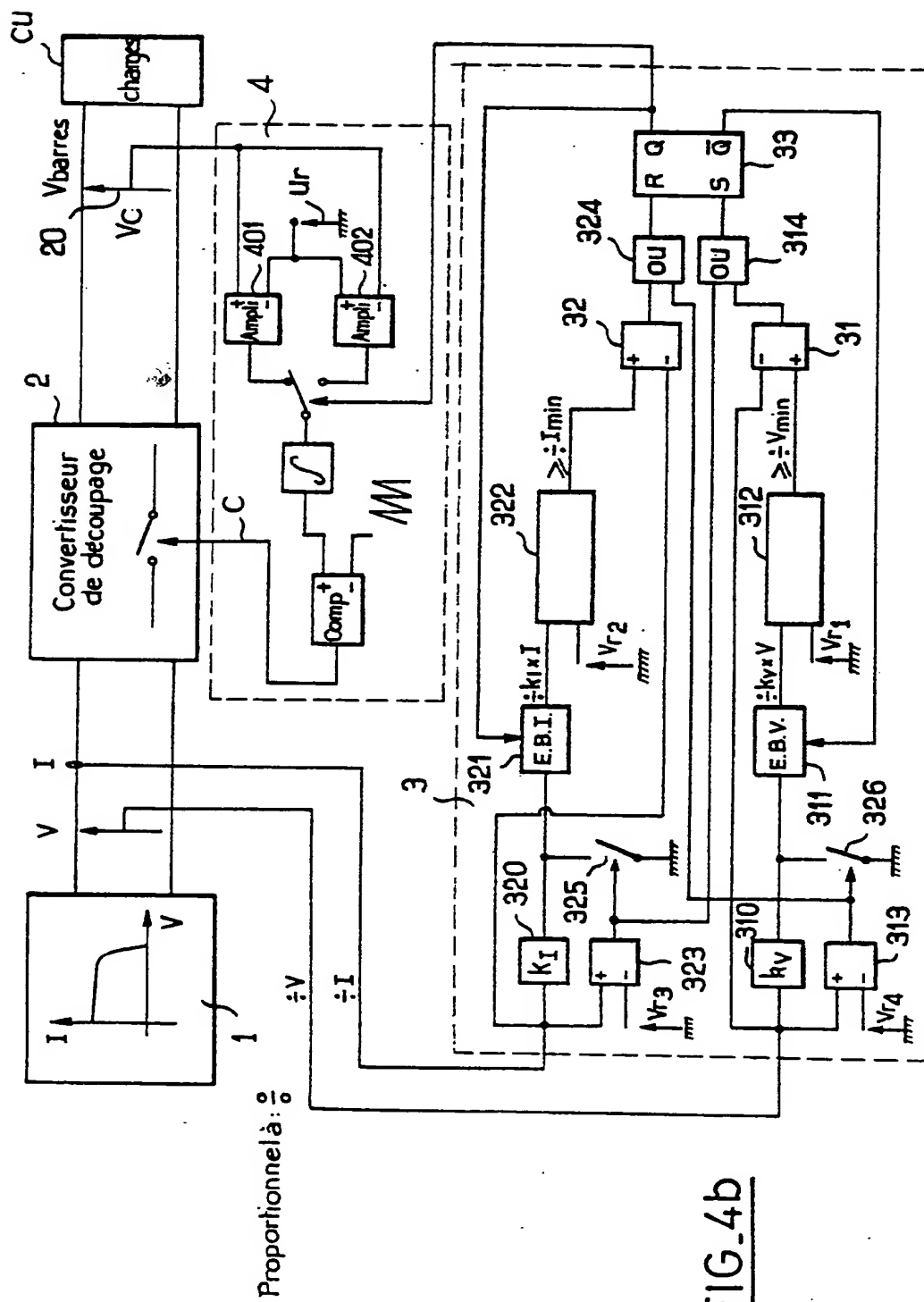
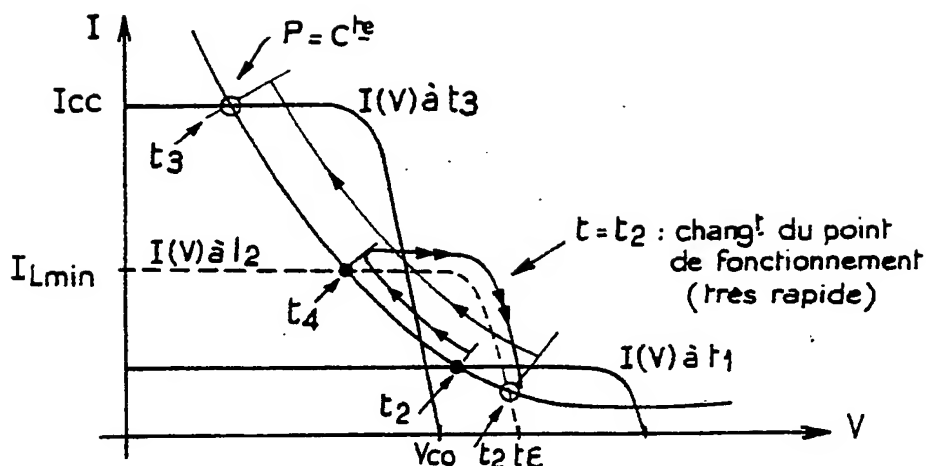
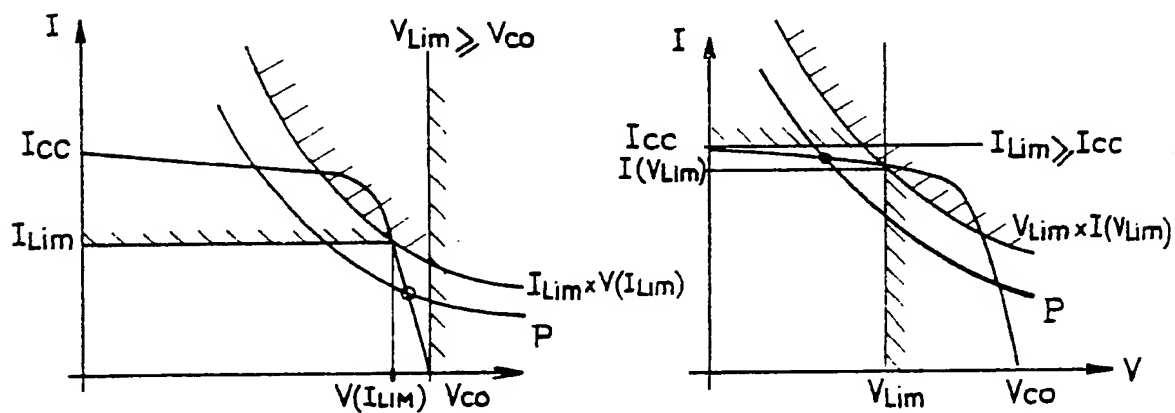


FIG. 4b

7 / 7.



date: t_1 : caract. $I(V)$ du générateur solaire froid et peu éclairé, $t_1 < t_2 < t_3$
 t_2 : _____ dans des conditions intermédiaires
 t_3 : _____ plus chaud et plus éclairé.

FIG_4cFIG_4dFIG_4e

